УДК 691.87:691.714:539.434

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОСТІ ПЕРЛІТУ НА ВТОМУ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Х. А. АСКЕРОВ [1], *І. О. ВАКУЛЕНКО* [2]

[1] *Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро;*
[2] *Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*

Показано, що за кутовим коефіцієнтом дотичної до кривої втоми можна визначити характер впливу дисперсності перліту на витривалість вуглецевої сталі. За незмінної товщини феритного прошарку перліту встановлено обернено пропорційний зв'язок між цим коефіцієнтом і густиною накопичених дислокацій. Оцінено механізм впливу дисперсності перліту на перехід від мало- до багатоциклової втоми вуглецевої сталі.

Ключові слова: *вуглецева сталь, дисперсність перліту, дислокації, витривалість.*

Вступ. Зміна структурного стану вуглецевої сталі суттєво впливає на її міцність за циклічного навантаження [1, 2]. Зокрема, зі зменшенням товщини феритного прошарку (λ) перліту підвищується границя втоми вуглецевої сталі [3, 4]. Це супроводжується зниженням кутового коефіцієнта дотичної до кривої втоми на різних ділянках. Здебільшого перехід від ділянок мало- до багатоциклової втоми відбувається з порушенням монотонного ходу кривих [5]. Ця аномалія значною мірою залежить від сумарного впливу низки чинників, основними з яких є структурний стан металевого матеріалу, умови циклічного навантаження тощо [2, 4–6]. Аналіз природи виникнення таких порушень кривих втоми вказує на різні причини: нерівномірність розвитку структурних перетворень [6] і розповсюдження деформації [4]; зміна активних кристалографічних систем ковзання [7] після досягнення певного співвідношення між амплітудою і кількістю циклів до моменту руйнування; зміна напруженого стану металу попереду зростаючої тріщини [4, 7].

Мета роботи – уточнити механізм впливу дисперсності перліту на обмежену витривалість вуглецевої сталі.

Матеріал і методика. Досліджували вуглецеву сталь залізничного колеса з вмістом вуглецю 0,61%, леговану в межах марочного складу сталі 60. Різну дисперсність перліту отримували охолодженням металу до певних температур ізотермічної витримки з тривалістю, достатньою для закінчення перлітного перетворення. Оцінювали λ за методиками кількісної металографії [8]. Значення λ дорівнювали 0,14; 0,19; 0,26; 0,30; 0,33 та 0,5 μm. Густину дислокацій (ρ_{211}) вимірювали за методикою рентгенівського структурного аналізу за параметрами лінії (211). Випробовували на втому на машині Сатурн-10 за кімнатної температури на зразках-смугах завтовшки 1 mm за симетричного циклу навантаження згином з частотою 16 Hz.

Результати та їх обговорення. За переходу від мало- до багатоциклової ділянки кривих втоми спостерігаємо порушення їх монотонного ходу. Зменшення λ призводить до зростання амплітуди циклу (σ_a), з одночасним зсувом положення межі цього переходу по осі циклів (N_1) в область менших значень (рис. 1). За збіль-

Контактна особа: І. О. ВАКУЛЕНКО, e-mail: vakulenko_ihor@ukr.net

шення λ приблизно у три рази, N_1 зростає у 2,5 рази (рис. 1*a*). Порівняно з N_1, характер зміни σ_a від λ не такий однозначний (рис. 1*b*), що потребує подальшого вивчення. Загалом отримано практично еквідистантно розташовані криві втоми досліджуваної сталі, де збільшення λ спричиняє зниження обмеженої витривалості (рис. 1*b*), що підтверджується відомими результатами [7, 9].

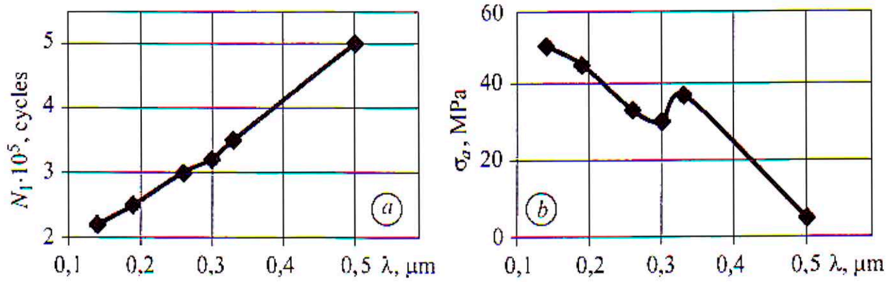

Рис. 1. Вплив дисперсності перліту на межу між ділянками мало- і багатоциклової втоми за різної кількістю циклів (*a*) і амплітуди (*b*) навантаження.

Fig. 1. Influence of pearlite dispersion on the boundary between the sections of low- and high-cycle fatigue for different loading cycles (*a*) and amplitude (*b*).

Щоб визначити механізм впливу λ на обмежену витривалість, використали співвідношення [3, 4]:

$$\sigma_a = K_a (N_i)^{-n}, \qquad (1)$$

де σ_a – амплітуда циклу; K_a – стала величина; n – показник ступеня. Після перетворень залежності (1), отримали співвідношення:

$$\frac{d\sigma_a}{dN_i} = -\frac{n \cdot \sigma_a}{N_i}, \qquad (2)$$

де $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ – кутовий коефіцієнт дотичної до кривої втоми. За сталого значення n для ділянок мало- або багатоциклової втоми поточні $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ будуть певною мірою залежати від значень N_i і σ_a. При цьому $\frac{d\sigma_a}{dN_i} \to 0$ за умов необмеженої витривалості, коли $N_i \to \infty$, а $\sigma_a \leq \sigma_{-1}$, де σ_{-1} – границя витривалості. Враховуючи, що $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ є мірою зменшення амплітуди циклу для підвищення втомної довговічності на 1 cycle, стадійний характер зміни структурних перетворень у металі залежно від ступеня циклічного навантаження [1–5] вказує на можливість існування зв'язку між $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ і λ. Для фіксованих значень обмеженої витривалості (N_i) залежно від значення λ встановлено (рис. 2*a*), що зниження ступеня циклічного навантаження супроводжується зміною характеру впливу λ: від обернено пропорційного для ділянки малоциклової втоми (криві *1*, *2*) до практичної відсутності впливу для перехідної області (крива *3*) і прямо пропорційного зв'язку для багатоциклової (криві *4*, *5*). Відомі результати експериментальних досліджень стосовно зміни напруженого стану в металі попереду зростаючої втомної тріщини від рівня циклічного перевантаження [4, 5, 9] вказують на можливість існування якісно різних

за характером залежностей $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ – λ. Дійсно, для області малоциклової втоми реалізується плосконапружений стан [5–7], а за умов багатоциклової – плоскодеформований. Внаслідок цього, характер накопичення дефектів кристалічної будови і їх розподіл залежно від амплітуди циклічного перевантаження повинні бути різними. На рис. 2*b* наведені залежності між $\frac{d\sigma_a}{dN_i}$ і ρ_{211} для сталі з найбільшою дисперсністю перліту (λ = 0,14 µm). На ділянці малоциклової втоми (точки 1 і 2) в металі реалізується плосконапружений стан і метал руйнується за відносно малої кількості дефектів кристалічної будови і, насамперед, дислокацій.

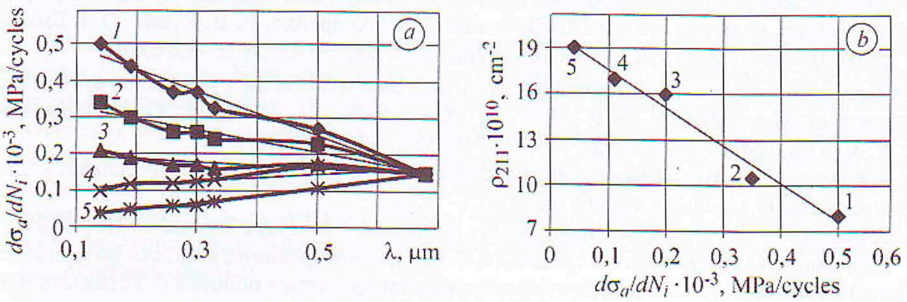

Рис. 2. Залежності між кутовим коефіцієнтом дотичної до кривої втоми та дисперсністю перліту (*a*: *1* – $N_i = 2\cdot10^5$; *2* – $3\cdot10^5$; *3* – $5\cdot10^5$; *4* – $6\cdot10^5$; *5* – $1\cdot10^6$ cycles), а також між цим коефіцієнтом і густиною дислокацій у зоні перед руйнування для λ = 0,14 µm (*b*).

Fig. 2. Relationship between the angular coefficient of the tangential fatigue curve and pearlite dispersion (*a*: *1* – $N_i = 2\cdot10^5$; *2* – $3\cdot10^5$; *3* – $5\cdot10^5$; *4* – $6\cdot10^5$; *5* – $1\cdot10^6$ cycles) and also between this coefficient and dislocation density in the process zone for value of λ = 0.14 µm (*b*).

Для багатоциклової ділянки кривої втоми з низьким рівнем циклічного навантаження (точки 4 і 5 на рис. 2*b*) існують умови плоскодеформованого стану [7]. На підставі цього, деформація за цикл відбуватиметься за участі великої кількості рухомих дислокацій. Момент виникнення неоднорідності в розподілі дислокацій і початок формування осередку втомної тріщини зсунутий у бік збільшення кількості циклів навантаження до руйнування для накопичення підвищеної густини дислокацій. Перехідна область (точка 3) є результатом одночасного впливу різних напружених станів металу в околі вершини зростаючої втомної тріщини.

ВИСНОВКИ

За умови незмінної дисперсності перліту кутовий коефіцієнт дотичної до кривої втоми і густина накопичених дислокацій за циклічного навантаження мають обернено пропорційне співвідношення. За цим коефіцієнтом можна оцінити характер впливу дисперсності перліту вуглецевої сталі на умови переходу від мало- до багатоциклової втоми.

РЕЗЮМЕ. Показано, что с помощью углового коэффициента касательной к кривой усталости можно определить характер влияния дисперсности перлита на выносливость углеродистой стали. Для неизменной толщины ферритного слоя перлита установлена обратно пропорциональная связь между этим коэффициентом и плотностью накопленных дислокаций. Оценен механизм влияния дисперсности перлита на переход от мало- к многоцикловой усталости углеродистой стали.

Ключевые слова: *углеродистая сталь, дисперсность перлита, дислокации, выносливость.*

SUMMARY. It is shown that the angular coefficient of the tangential fatigue curve is used to analyze the effect of pearlite dispersion colony on the cyclic endurance of carbon steel. Under conditions of constant thickness of the pearlite ferrite layer, an inversely proportional relationship between the angular coefficient of the tangential fatigue curve and the density of accumulated dislocations is found. The mechanism of the effect of pearlite dispersion on the transition from low- to multi-cycle fatigue of carbon steel is assessed.

Keywords: *carbon steel, pearlite dispersion, dislocations, durability.*

1. *Романив О. Н., Ткач А. Н., Симинькович В. Н.* Структура и припороговая усталость сталей // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – **19**, № 4. – С. 19–33.

   (*Romaniv O. N., Tkach A. N., Siminkovich V. N.* Structure and near-threshold fatigue of steels // Soviet Materials Science. – 1984. – **19**, № 4. – P. 272–285.)
2. *Вплив* режиму термічної обробки і асиметрії циклу навантаження на циклічну тріщиностійкість колісних сталей / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик, О. І. Бабаченко, В. В. Віра // Фіз.- хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 2. – С. 63–70.

   (*Influence* of the mode of thermal treatment and load ratio on the cyclic crack-growth resistance of wheel steels / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, O. I. Babachenko, V. V. Vira // Materials Science. – 2009. – **45**, № 2. – P. 211–219.).
3. *Вакуленко І. О.* Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу. – Дніпропетровськ: Маковецький Ю. В., 2012. – 152 с.
4. *Трощенко В. Т.* Усталость и неупругость металлов. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.
5. *Иванова В. С., Ботвина Л. Р., Маслов Л. И.* Прогнозирование вязкости разрушения и других механических свойств с использованием критериев подобия // Усталость и вязкость разрушения металлов. – М.: Наука, 1974. – С. 3–35.
6. *Одинг И. А.* Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
7. *Иванова В. С., Гуревич С. Е., Коптев И. М.* Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 214 с.
8. *Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Погребная Н. Э.* Атлас структур металлов и сплавов. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2001. – 114 с.
9. *Гуревич С. Е.* Исследование некоторых закономерностей рассеяния энергии при усталости в зависимости от уровня приложенного напряжения // Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – С. 23–31.

Одержано 03.09.2019